

Máquinas térmicas e de fluxo

Aula 09:

Análises da Massa e da Energia em Volumes de Controle

DSc. Eng. Samuel Moreira Duarte Santos
Engenheiro Mecânico
CREA MG 106478D

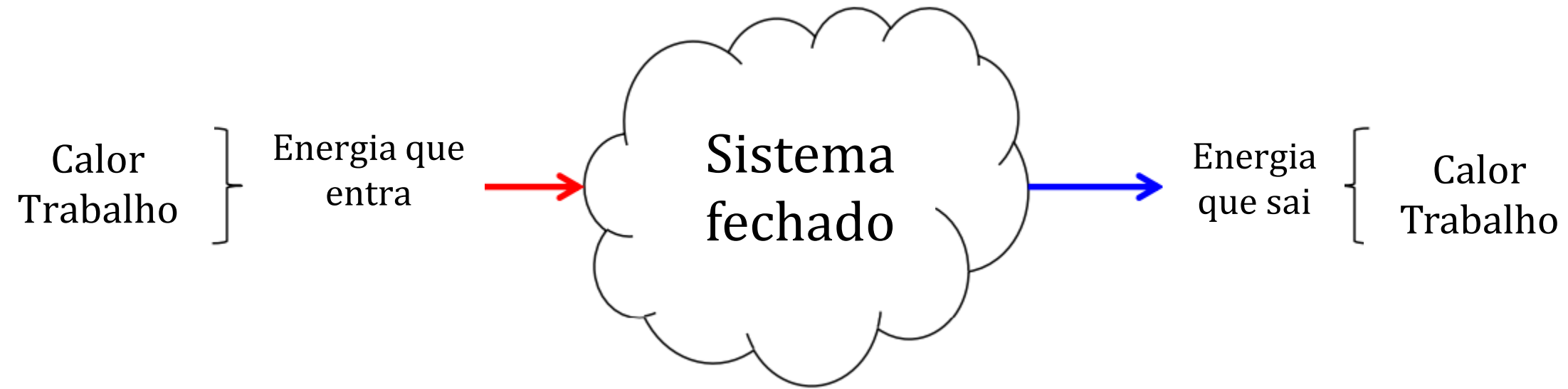
Rio de Janeiro, 31 de maio 2023

Samuel Moreira Duarte Santos

Agenda

- Revisão: Princípio da conservação da energia: sistema fechado;
- Sistemas aberto;
- Fluxo de massa através da fronteira;
- Balanço de massa;
- Primeira lei da termodinâmica em sistemas abertos;
- Trabalho de fluxo;
- Energia total de uma substância escoando;
- Primeira lei da termodinâmica em sistemas aberto (Regime permanente);
- Equipamentos;
- Aplicação prática;

Primeira lei da termodinâmica em sistemas fechados

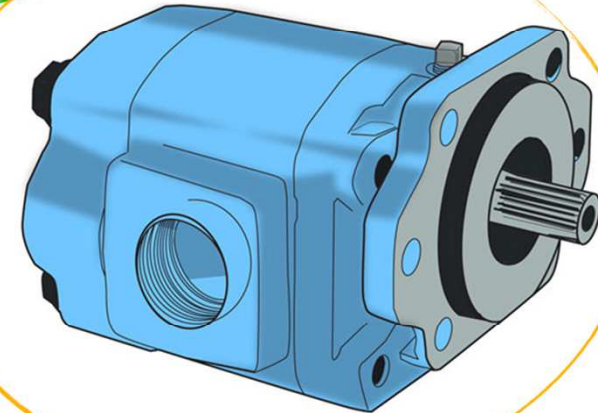
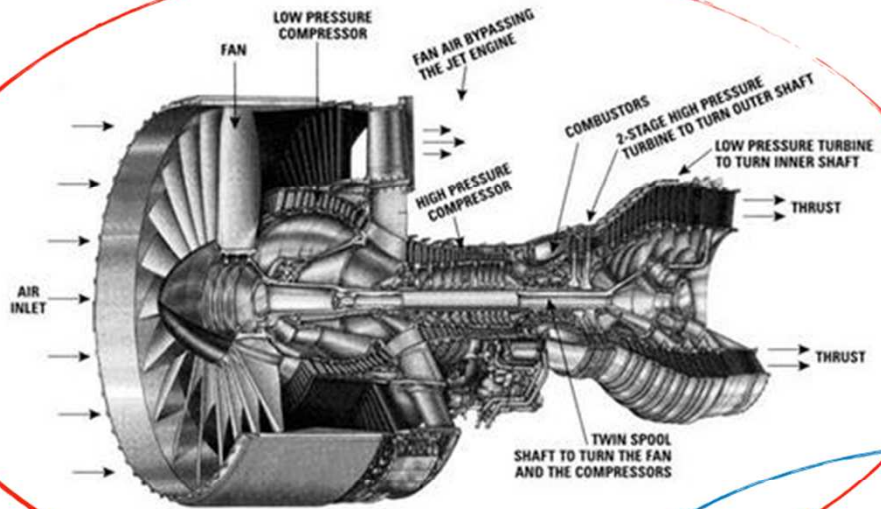


$$\Delta E = E_{entra} - E_{sai}$$

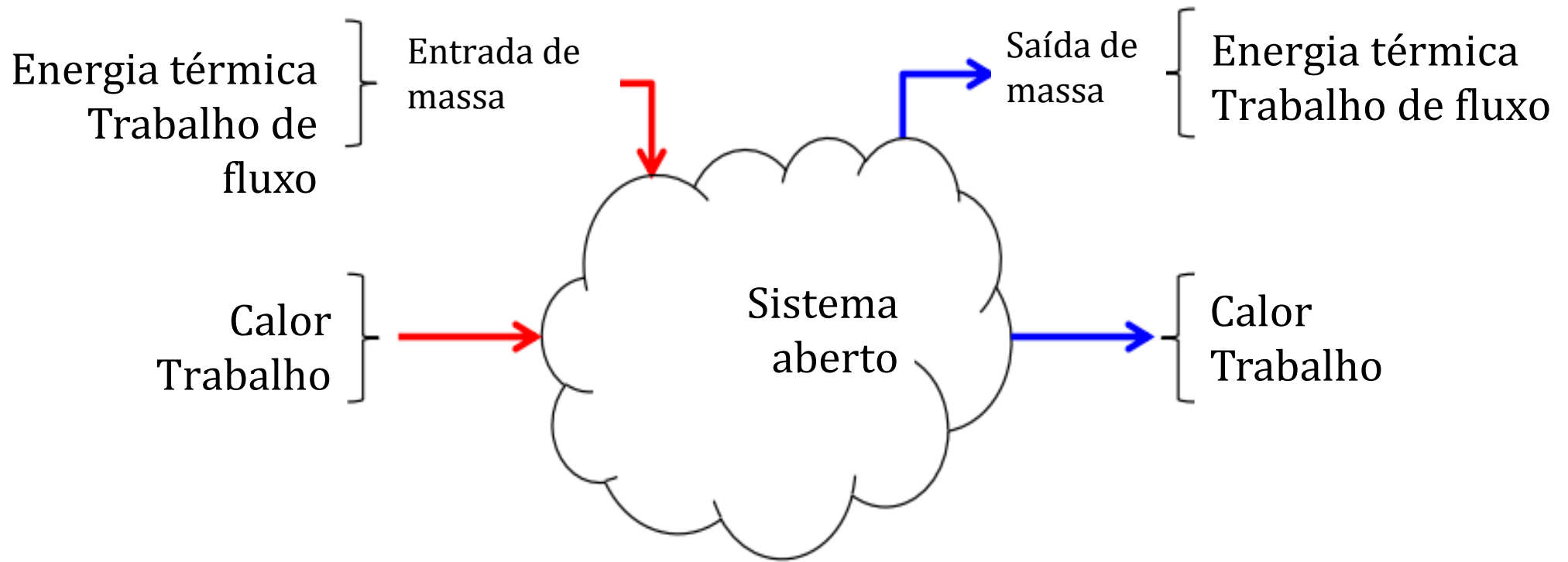
$$\Delta E = \Delta U + \Delta EC + \Delta EP$$

$$\Delta U = m(u_2 - u_1) \quad \Delta EC = \frac{m}{2} (\mathbb{V}_2^2 - \mathbb{V}_1^2) \quad \Delta EP = mg(z_2 - z_1)$$

Sistemas abertos



Sistemas abertos

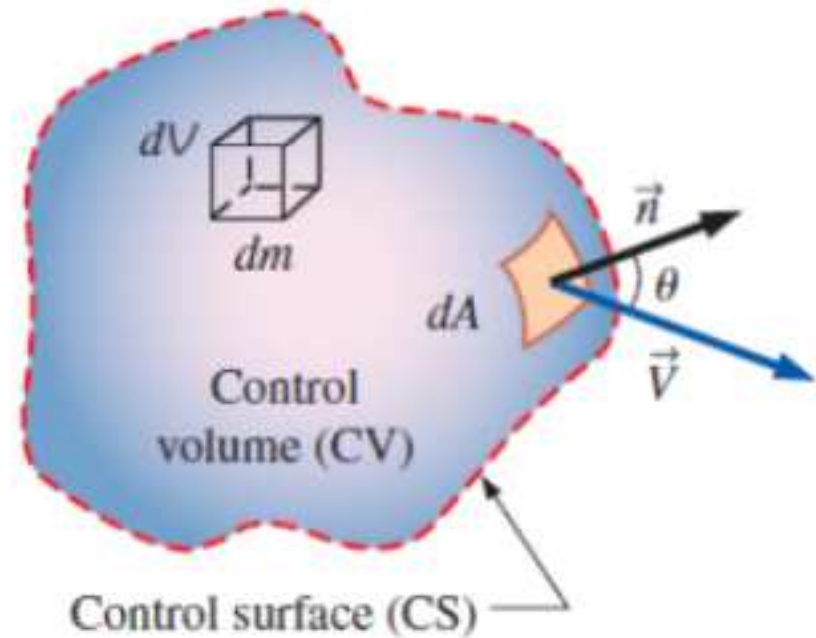
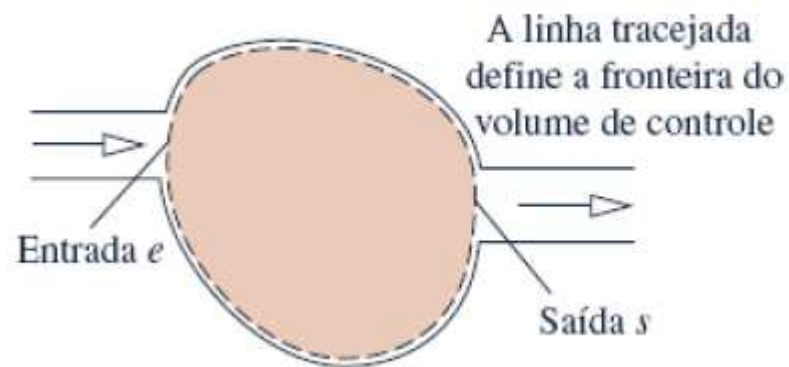
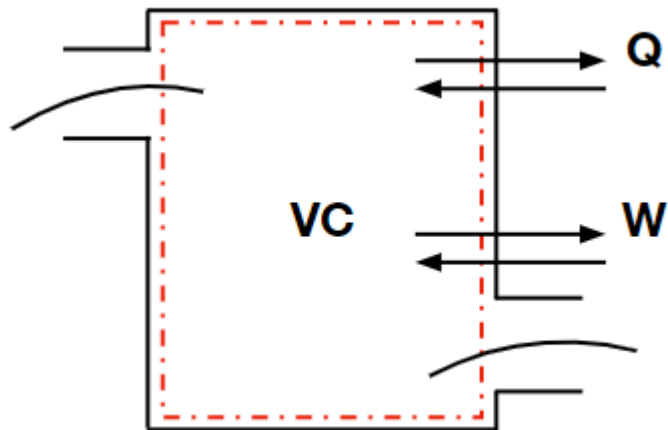


Energia Térmica: Energia interna associada com o fluxo mássico entrando e saindo do volume de controle.

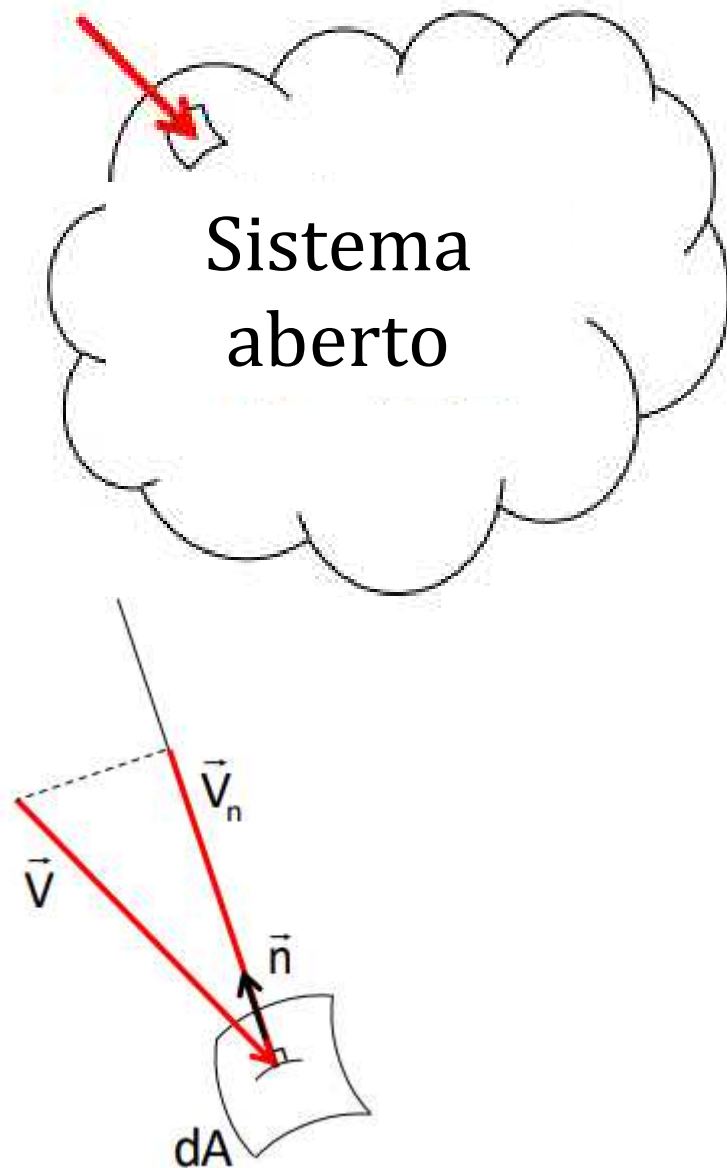
Trabalho mecânico: (força x deslocamento) necessário para que um elemento de massa seja empurrado ou puxado para fora do volume de controle.

$$\eta = \frac{W_{Liq}}{Q_h}$$

Balanço de massa



Fluxo de massa através da fronteira: entrando



$$Vazão_{volumétrica} = \nabla A$$

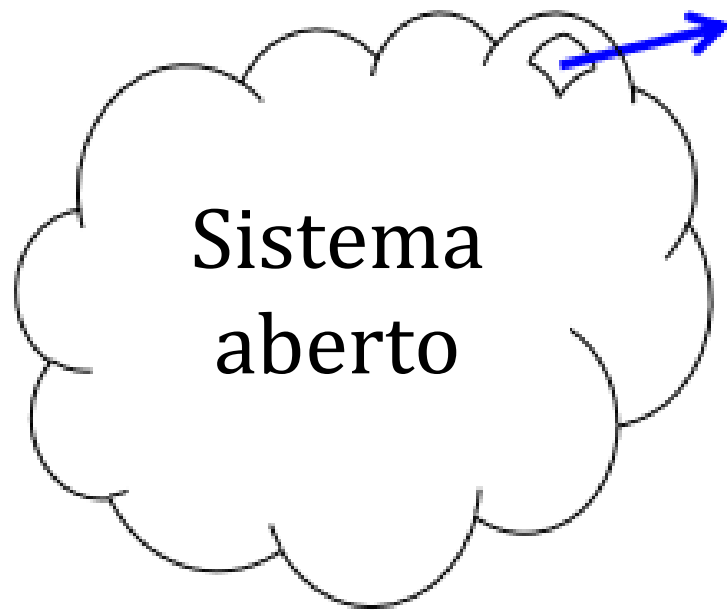
$$\dot{m} = \rho \nabla A$$

$$d\dot{m}_{entra} = \rho \nabla_n dA$$

$$d\dot{m}_{entra} = -\rho (\vec{\nabla} \cdot \vec{n}) dA$$

$$\dot{m}_{entra} = - \int_{A_{entrada}} \rho (\vec{\nabla} \cdot \vec{n}) dA$$

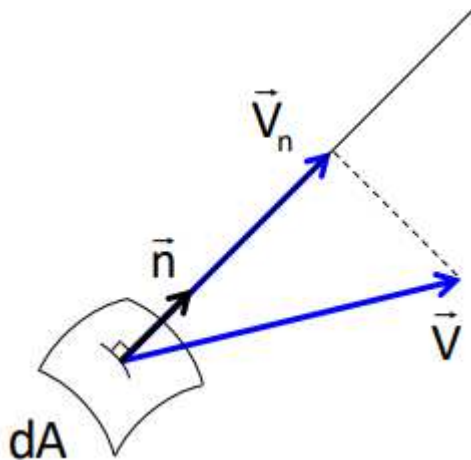
Fluxo de massa através da fronteira: saindo



$$d\dot{m}_{sai} = \rho \mathbb{V}_n dA$$

$$d\dot{m}_{sai} = +\rho \left(\vec{\mathbb{V}} \cdot \vec{n} \right) dA$$

$$\dot{m}_{entra} = + \int_{A_{saída}} \rho \left(\vec{\mathbb{V}} \cdot \vec{n} \right) dA$$



Fluxo de massa através da fronteira total



$$\dot{m}_{Total} = \int_{A_{total}} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA$$

$$\dot{m}_{Total} > 0 \rightarrow \textit{saindo}$$

$$\dot{m}_{Total} < 0 \rightarrow \textit{entrando}$$

Equação de balanço de massa: forma generalizada

$$\left(\begin{array}{c} \textit{Taxa de variação} \\ \textit{da massa do sistema} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \textit{Fluxo total de} \\ \textit{massa entrando} \end{array} \right) = 0$$

$$\frac{dM}{dt} + \int_{SC} \rho \left(\vec{\nabla} \cdot \vec{n} \right) dA = 0$$

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow m = \rho V$$

$$\frac{d}{dt} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho \left(\vec{\nabla} \cdot \vec{n} \right) dA = 0$$

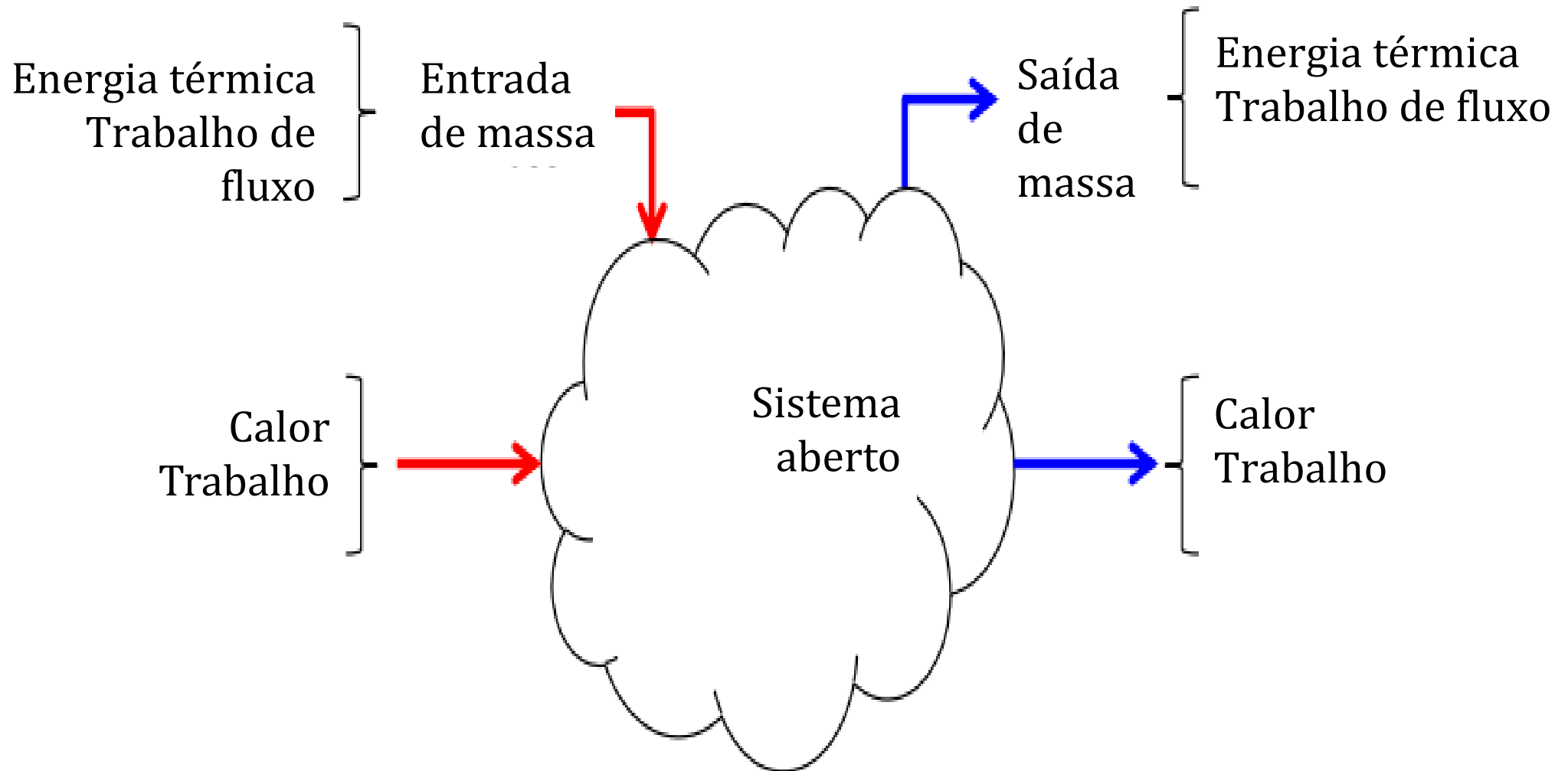
Equação de balanço de massa: forma discreta

$$\left(\begin{array}{c} \text{Taxa de variação} \\ \text{da massa do sistema} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Fluxo total de} \\ \text{massa entrando} \end{array} \right) = 0$$

$$\frac{dM}{dt} + \left(\sum_{\text{saídas}} m_{\text{sai},k} - \sum_{\text{entradas}} m_{\text{entrada},k} \right) = 0$$

$$\frac{dM}{dt} + \left(\sum_{\text{saídas}} \rho_k V_{n,k} A_k - \sum_{\text{entradas}} \rho_k V_{n,k} A_k \right) = 0$$

Primeira lei da termodinâmica em sistemas abertos:

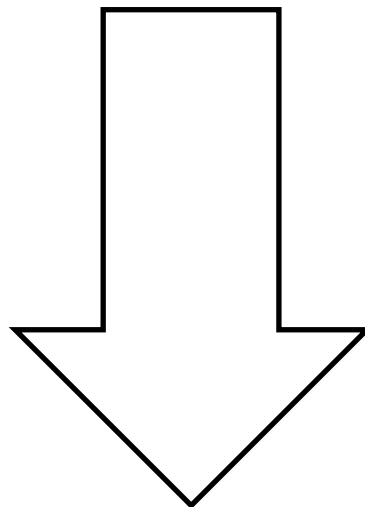


Primeira lei da termodinâmica em sistemas abertos:

- Transporte de energia térmica: Energia térmica, ou interna ($u + e_p + e_c$), associada ao fluxo de massa entrando/saindo do VC e que deve ser contabilizado.
- Trabalho de fluxo: Trabalho mecânico (força x deslocamento) necessário para que um elemento de massa entre/saia do VC...

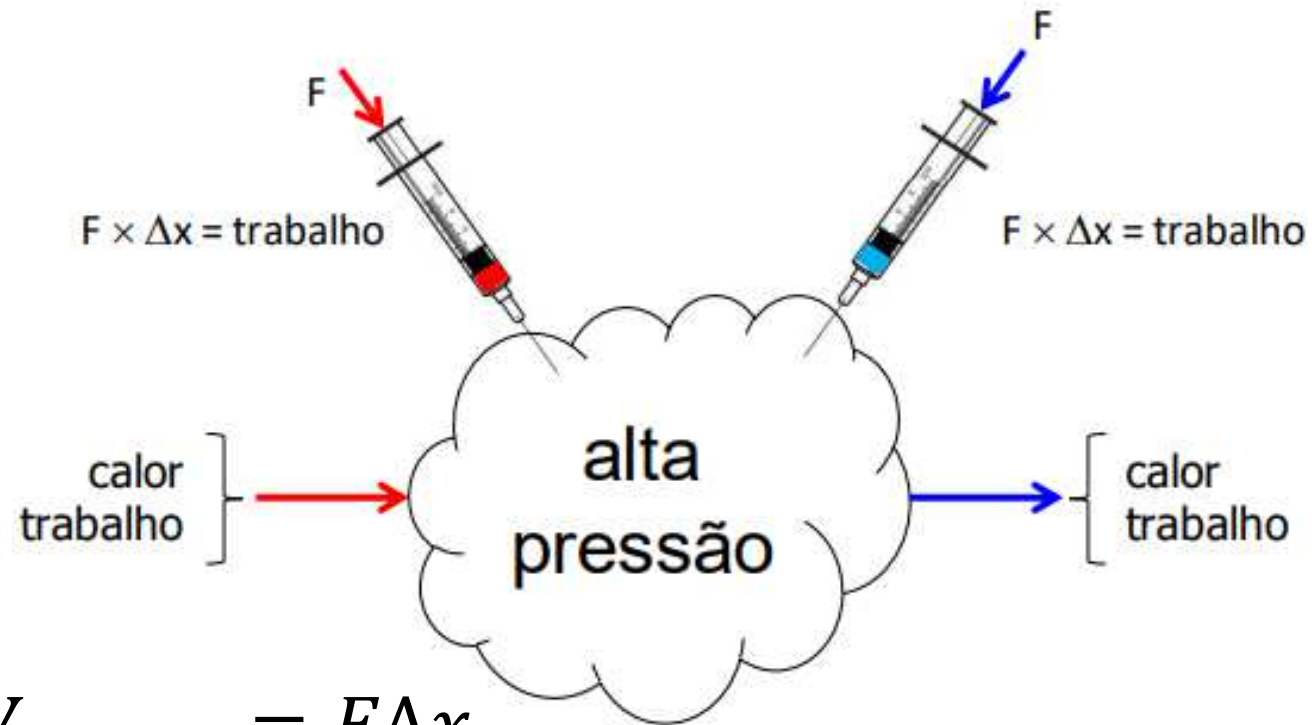
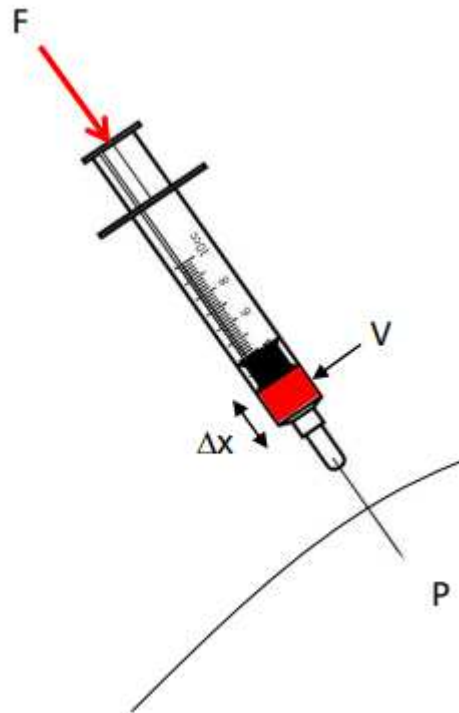
Sistemas abertos

$$\Delta E = (E_{entra} - E_{sai})_{Q,W} + (E_{entra} - E_{sai})_{massa}$$



$$\frac{dE}{dt} = \left(\frac{dE_{entra}}{dt} - \frac{dE_{sai}}{dt} \right)_{Q,W} + \left(\frac{dE_{entra}}{dt} - \frac{dE_{sai}}{dt} \right)_{massa}$$

Trabalho de fluxo entrando



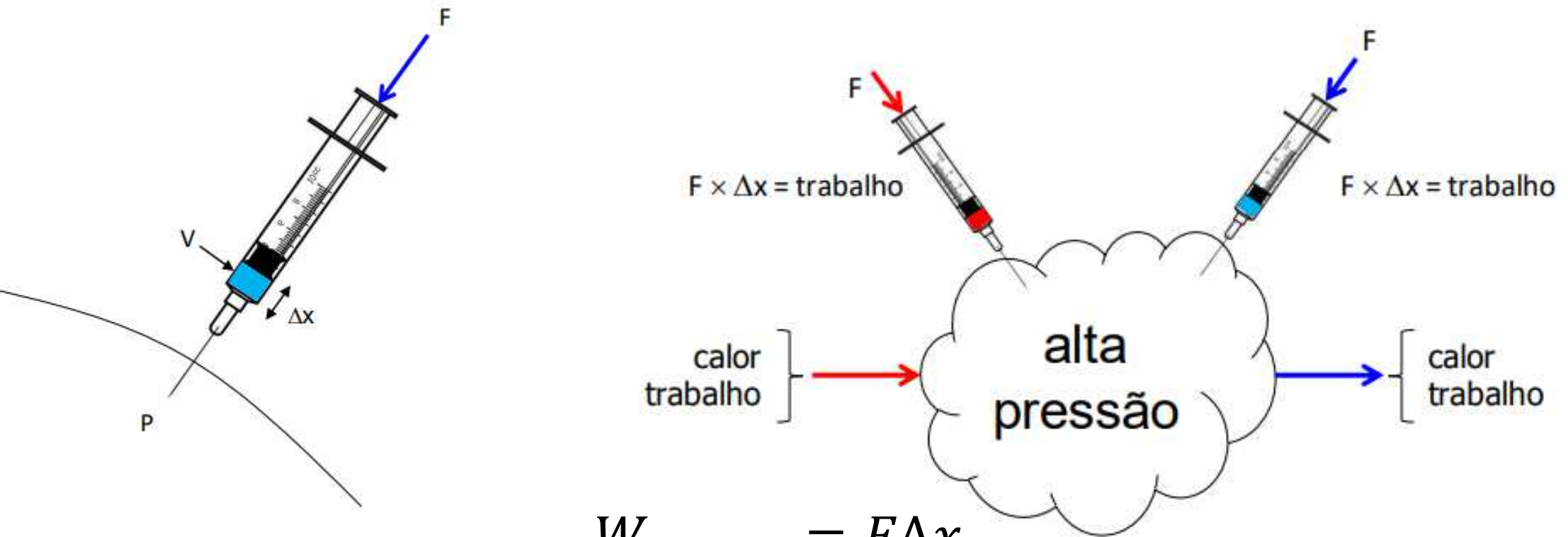
$$W_{Fluxo,e} = F\Delta x$$

$$W_{Fluxo,e} = (PA)\Delta x$$

$$W_{Fluxo,e} = P(A\Delta x)$$

$$W_{Fluxo,e} = PV$$

Trabalho de fluxo saindo



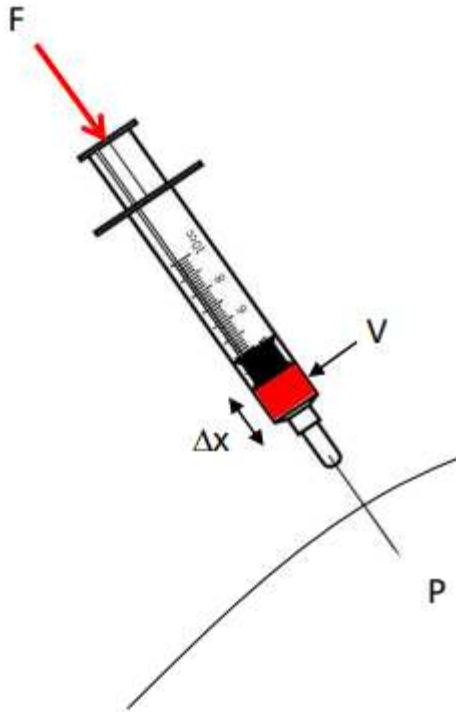
$$W_{Fluxo,s} = F\Delta x$$

$$W_{Fluxo,s} = (PA)\Delta x$$

$$W_{Fluxo,s} = P(A\Delta x)$$

$$W_{Fluxo,s} = PV$$

Energia total de uma substância escoando θ



$$E = m \left(u + gz + \frac{V^2}{2} \right)$$

$$E = \rho V \left(u + gz + \frac{V^2}{2} \right)$$

$$\theta = E + W_{Fluxo}$$

$$\left(\text{Energia Interna} \right) + \left(\text{Trabalho de Fluxo} \right)$$

$$\theta = m \left(u + gz + \frac{V^2}{2} \right) + mF\Delta x$$

$$\theta = \rho V \left(u + gz + \frac{V^2}{2} \right) + mPV$$

Energia total de uma substância escoando θ

$$\theta = E + W_{Fluxo}$$

$$E = m \left(u + gz + \frac{V^2}{2} \right) \quad W_{Fluxo} = F \Delta x = (PA) \Delta x = PV$$

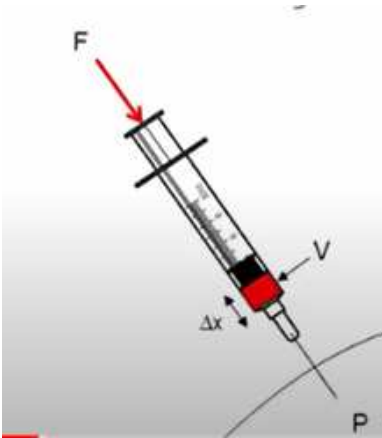
$$\theta = m \left(u + gz + \frac{V^2}{2} \right) + PV$$

$$\theta = m \left(u + gz + \frac{V^2}{2} \right) + m(Pv)$$

$$\theta = m \left(u + Pv + gz + \frac{V^2}{2} \right)$$

$$h = u + Pv$$

$$\theta = m \left(h + gz + \frac{V^2}{2} \right)$$



Primeira lei da termodinâmica em sistemas aberto (Regime transiente)

$$\frac{dE}{dt} = \left(\frac{dE_{entra}}{dt} - \frac{dE_{sai}}{dt} \right)_{Q,W} + \left(\frac{dE_{entra}}{dt} - \frac{dE_{sai}}{dt} \right)_{massa}$$

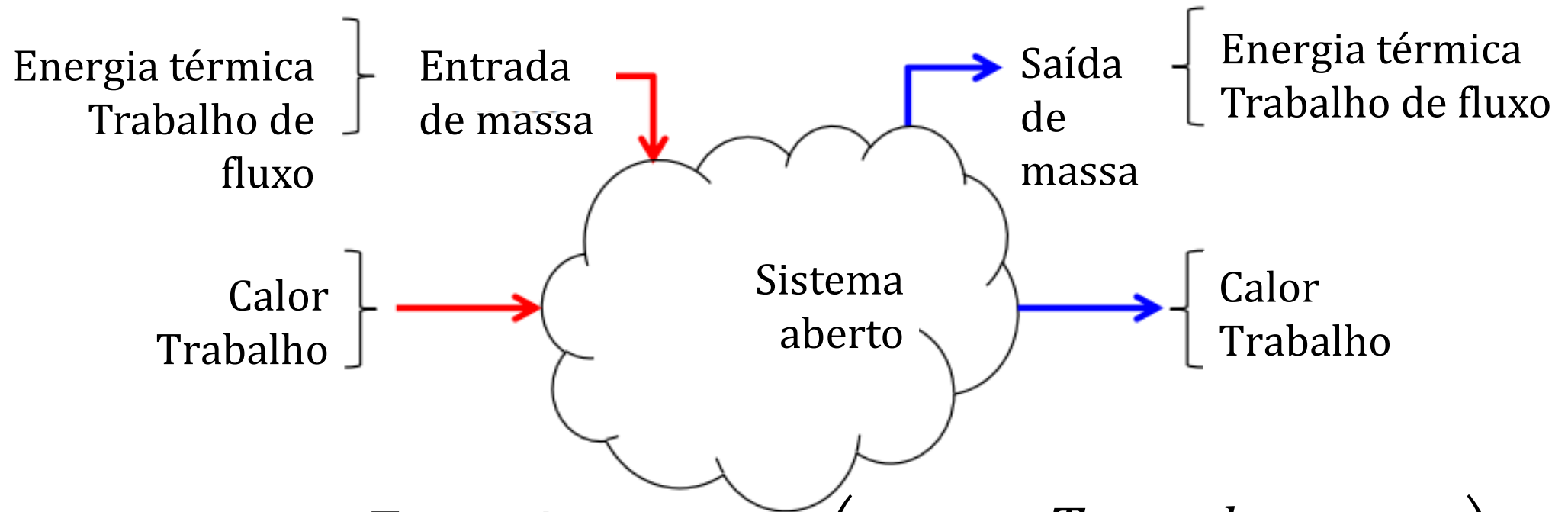
$$\frac{dE_{VC}}{dt} = (\dot{Q}_e - \dot{Q}_s) - (\dot{W}_s - \dot{W}_e) + \sum_e \dot{m}_e \theta_e - \sum_s \dot{m}_s \theta_s$$

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_e \dot{m}_e \theta_e - \sum_s \dot{m}_s \theta_s$$

$$\theta = m \left(h + \cancel{gz} + \cancel{\frac{V^2}{2}} \right) \quad \frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_e \dot{m}_e h_e - \sum_s \dot{m}_s h_s$$

$$\theta = m h$$

Primeira lei da termodinâmica em sistemas aberto (Regime permanente)

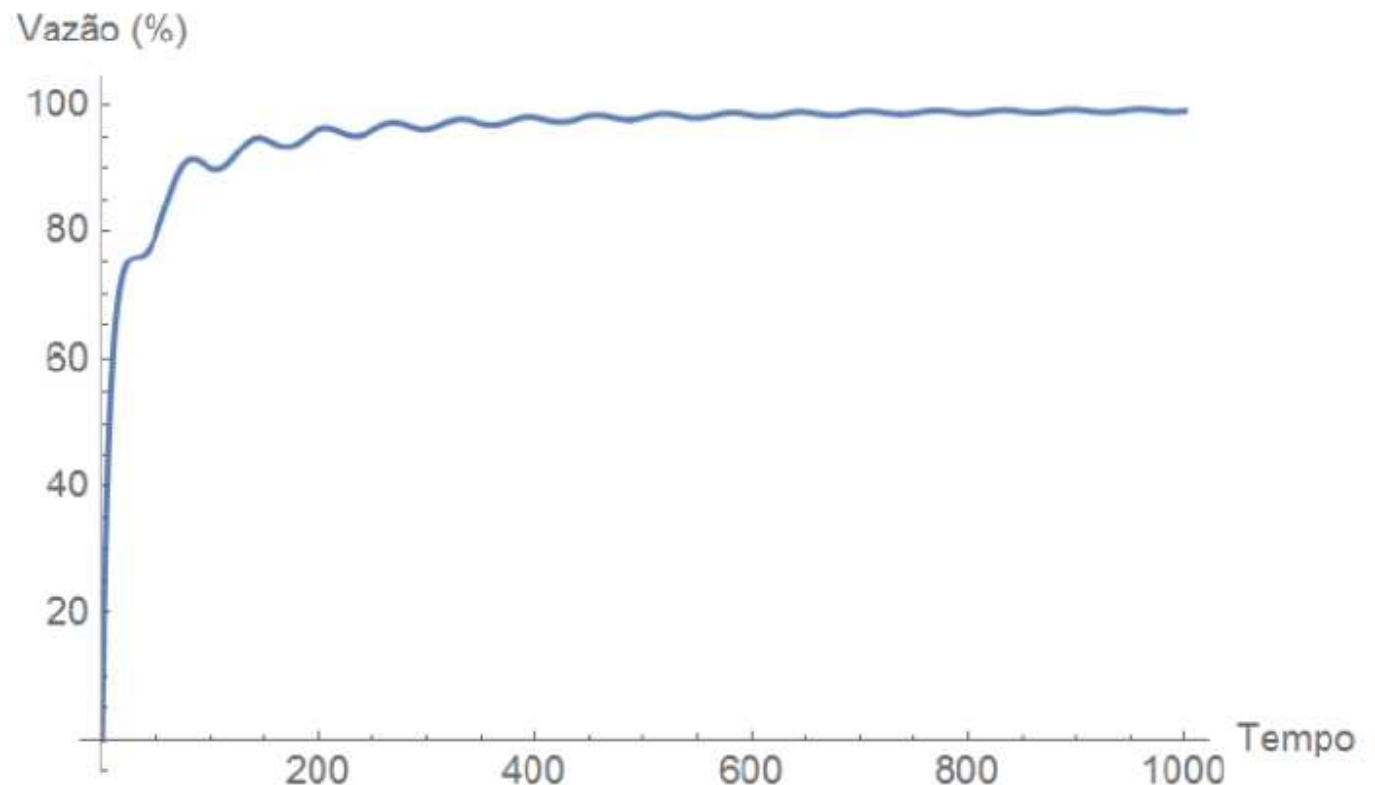


$$\left(\begin{array}{c} \text{Energia} \\ \text{total líquida} \\ \text{entrando no VC} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Taxa de} \\ \text{variação da} \\ \text{energia interna do VC} \end{array} \right)$$

$$\left(\begin{array}{c} \text{Energia} \\ \text{total líquida} \\ \text{entrando no VC} \end{array} \right) = 0 \quad \text{regime permanente}$$

Regime permanente

- Os processos em regime permanente são muito úteis para a análise de equipamentos que não alteram o regime de escoamento no tempo;
- Alguns equipamentos que p usualmente ser modelados como um processo em regime permanente são:
 - Turbinas;
 - Bombas;
 - Compressores;
 - Bocais; e
 - Trocadores de calor.



Hipóteses do Regime permanente

1. O volume de controle não se move com relação ao sistema de coordenadas;
2. O estado em cada ponto no volume de controle não varia com o tempo;
3. Nas fronteiras do volume de controle, as vazões mássicas e o estado das entradas saídas de fluxo de massa não variam com o tempo; e
4. As taxas de calor e trabalho que cruzam a fronteira do volume de controle são constantes.

Primeira lei da termodinâmica em sistemas aberto (Regime permanente)

$$\frac{dE_{yc}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_e \dot{m}_e \theta_e - \sum_s \dot{m}_s \theta_s$$

$$\dot{W} + \sum_s \dot{m}_s \theta_s = \dot{Q} + \sum_e \dot{m}_e \theta_e$$

$$\theta = m \left(h + g z + \frac{V^2}{2} \right) \rightarrow \theta = m h$$

$$\dot{W} + \sum_s \dot{m}_s h_s = \dot{Q} + \sum_e \dot{m}_e h_e$$

Primeira lei da termodinâmica em sistemas abertos:

Regime Permanente

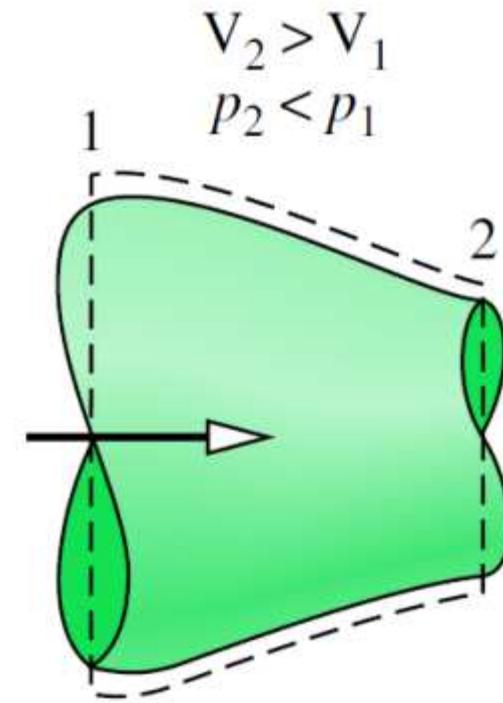
$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_s \dot{m}_s \theta_s - \sum_e \dot{m}_e \theta_e$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_s \dot{m}_s \left(u + Pv + gz + \mathbb{V}^2/2 \right)_s - \sum_e \dot{m}_e \left(u + Pv + gz + \mathbb{V}^2/2 \right)_e$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_s \dot{m}_K \left(h_k + gz_k + \mathbb{V}_k^2/2 \right)_s - \sum_e \dot{m}_K \left(h_k + gz_k + \mathbb{V}_k^2/2 \right)_s$$

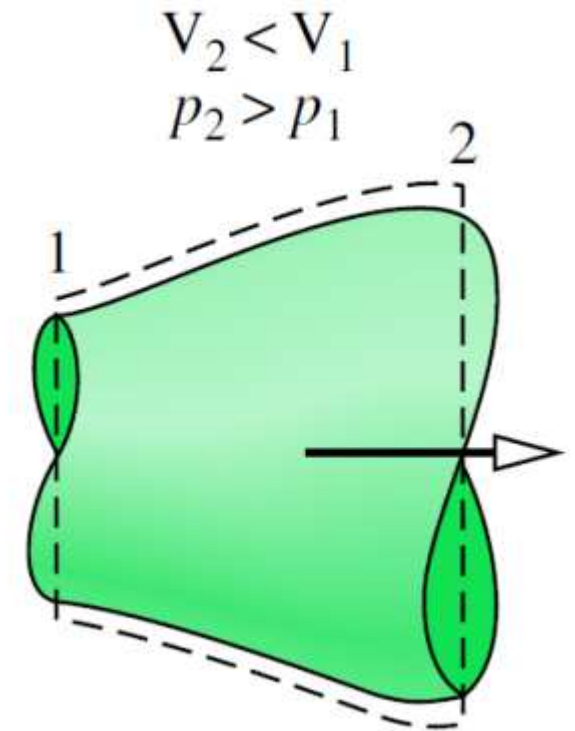
Bocal

- Objetivo: Acelerar o fluido:
 - Aumenta a velocidade e reduz a pressão;
- Hipóteses simplificadoras usuais:
 - Regime Permanente;
 - Trabalho é zero ($W=0$);
 - Despreza-se a troca de calor para o meio externo;
 - Despreza-se a diferença de energia potencial;
 - Diferença de energia cinética é



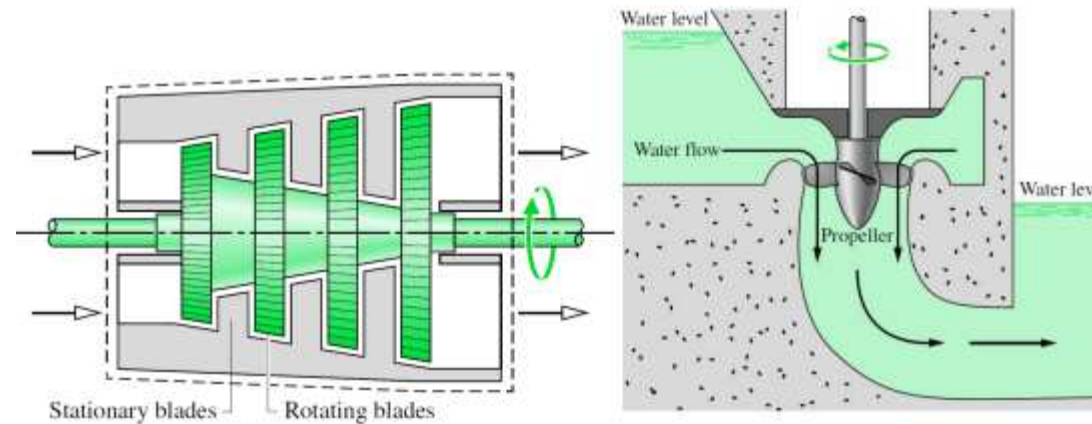
Difusor

- Objetivo: Desacelerar o fluido:
 - Reduz a velocidade e aumenta a pressão;
- Hipóteses simplificadoras usuais:
 - Regime Permanente;
 - Trabalho é zero ($W=0$);
 - Despreza-se a troca de calor para o meio externo;
 - Despreza-se a diferença de energia potencial;
 - Diferença de energia cinética é

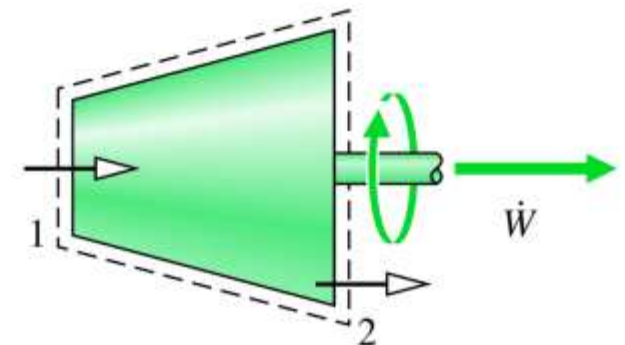


Turbina

- Objetivo: Gerar trabalho/potência de eixo
- Expande o fluido reduzindo a pressão
- Hipóteses simplificadoras usuais:
 - Regime Permanente;
 - Gera trabalho ($W > 0$);
 - Despreza-se a troca de calor para o meio externo;
 - Despreza-se a diferença de energia cinética e potencial

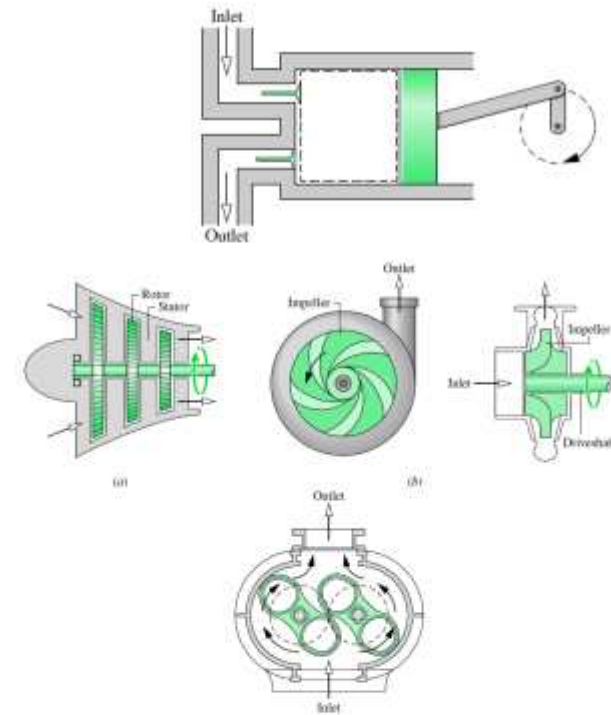


Símbolo em diagramas:

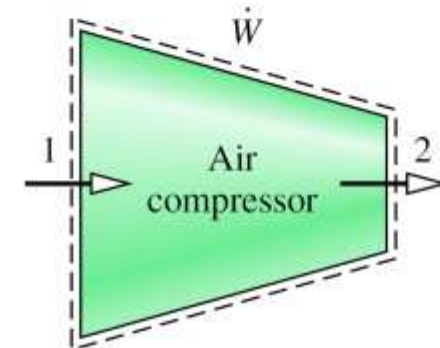


Compressor

- Objetivo: Comprimir um gás aumentando a pressão
- Hipóteses simplificadoras usuais:
 - Regime Permanente;
 - Necessita de trabalho ($W < 0$);
 - Despreza-se a troca de calor para o meio externo; e
 - Despreza-se a diferença de energia cinética e potencial.

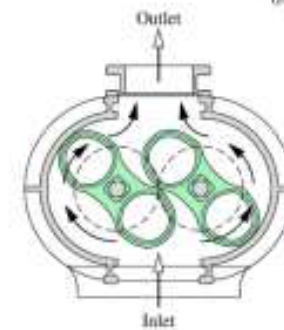
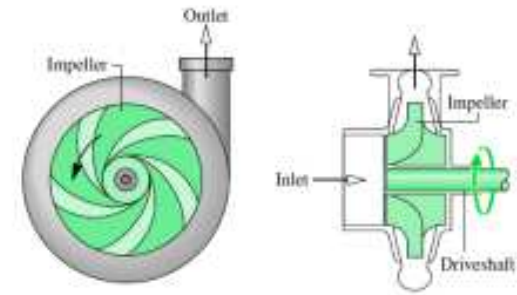
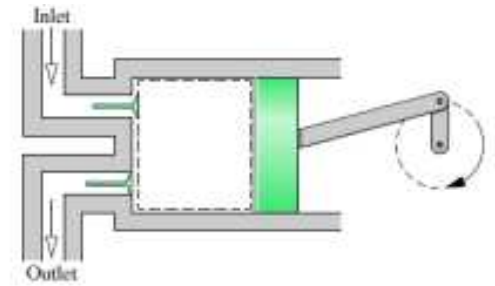


Símbolo em diagramas:



Bomba

- Objetivo: Comprimir um líquido aumentando a pressão
- Hipóteses simplificadoras usuais:
 - Regime Permanente;
 - Necessita de trabalho ($W < 0$);
 - Despreza-se a troca de calor para o meio externo; e
 - Despreza-se a diferença de energia cinética e potencial.

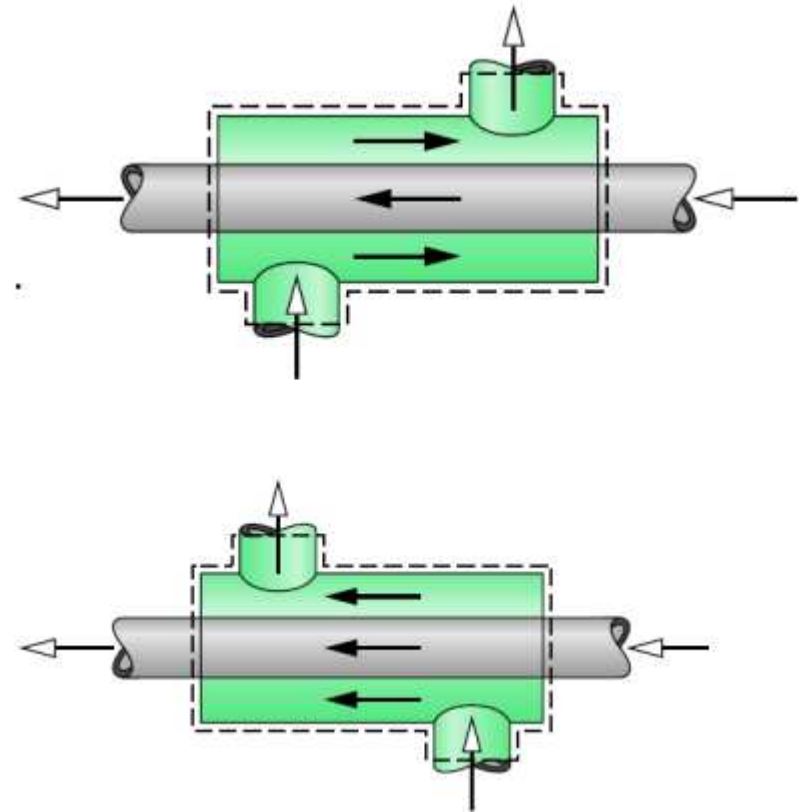


Símbolo em diagramas:



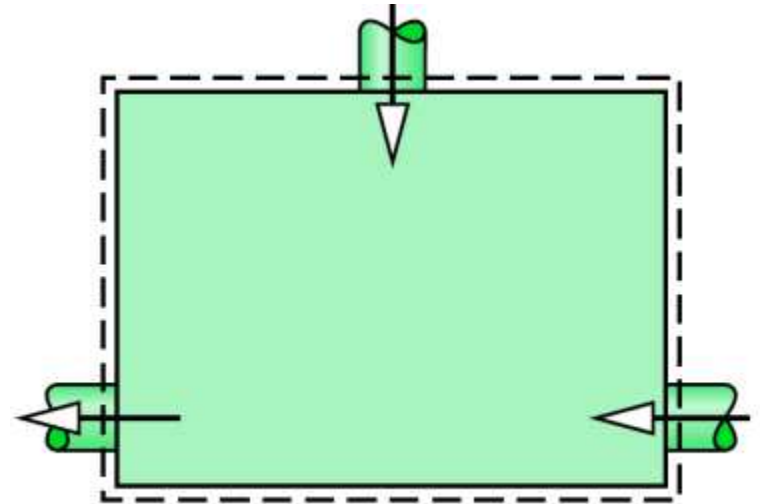
Trocador de calor

- Objetivo: Trocar calor entre duas correntes de fluidos sem mistura
- Hipóteses simplificadoras usuais:
 - Regime Permanente;
 - Trabalho é zero ($W=0$);
 - Despreza-se a troca de calor para o meio externo;
 - Despreza-se a diferença de energia cinética e potencial
 - Despreza-se a perda de carga: a pressão das duas correntes permanece constante.



Câmara de mistura

- Objetivo: Misturar duas correntes de fluidos;
- Hipóteses simplificadoras usuais:
 - Regime Permanente;
 - Trabalho é zero ($W=0$);
 - Despreza-se a troca de calor para o meio externo; e
 - Despreza-se a diferença de energia cinética e potencial.



Válvula ou Tubo Capilar

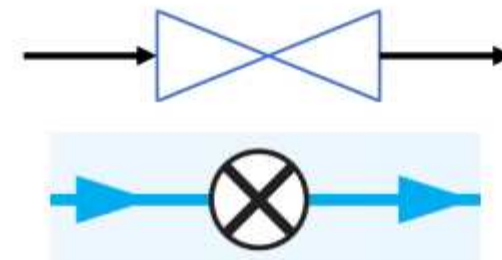
- Objetivo: Provocar perda de carga de um escoamento e assim reduzir a pressão ou bloquear completamente o fluido
- Hipóteses simplificadoras usuais:
 - Regime Permanente;
 - Trabalho é zero ($W=0$);
 - Despreza-se a troca de calor para o meio externo;
 - Despreza-se a diferença de energia cinética e potencial



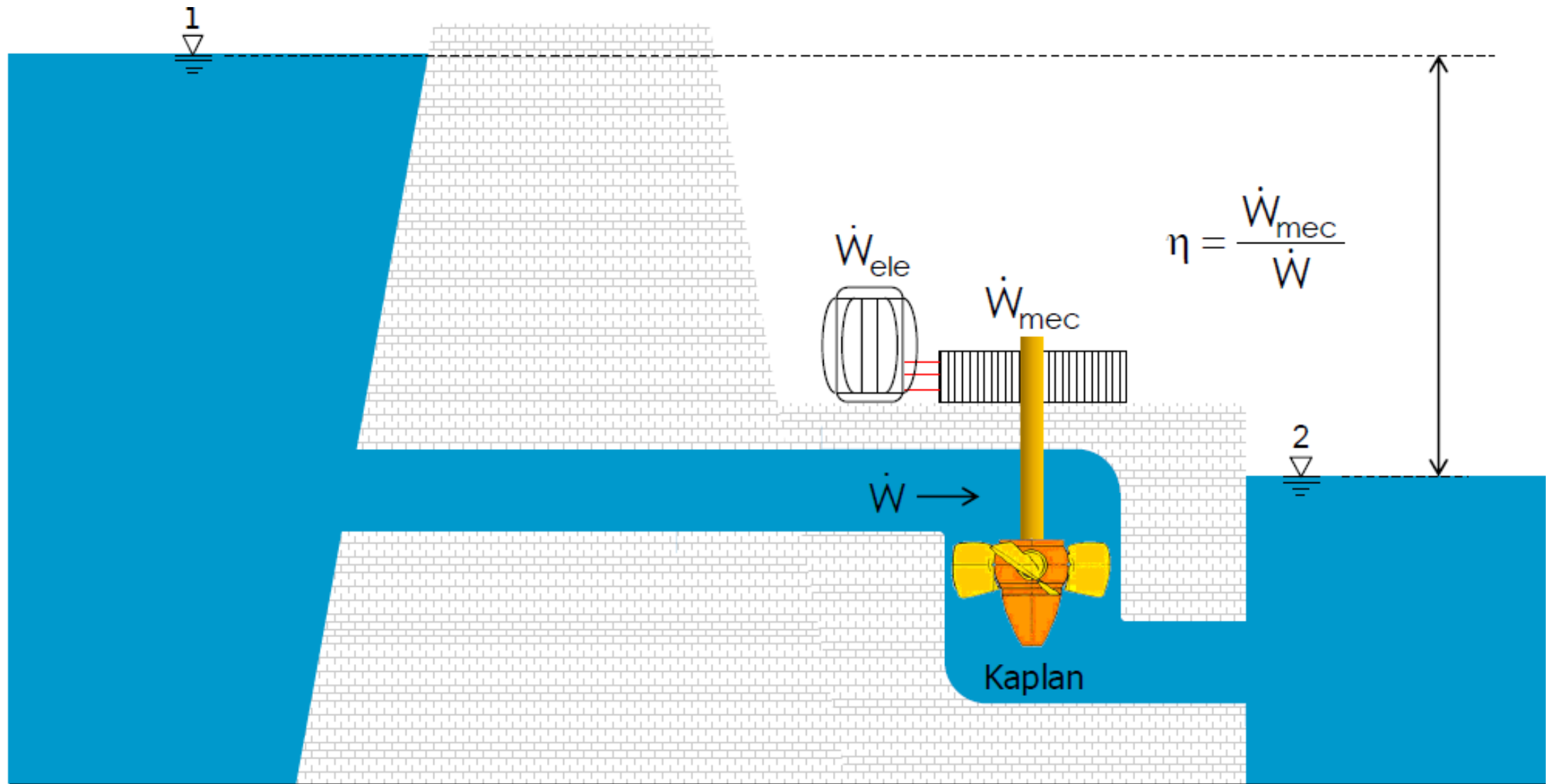
(a) Ball valve



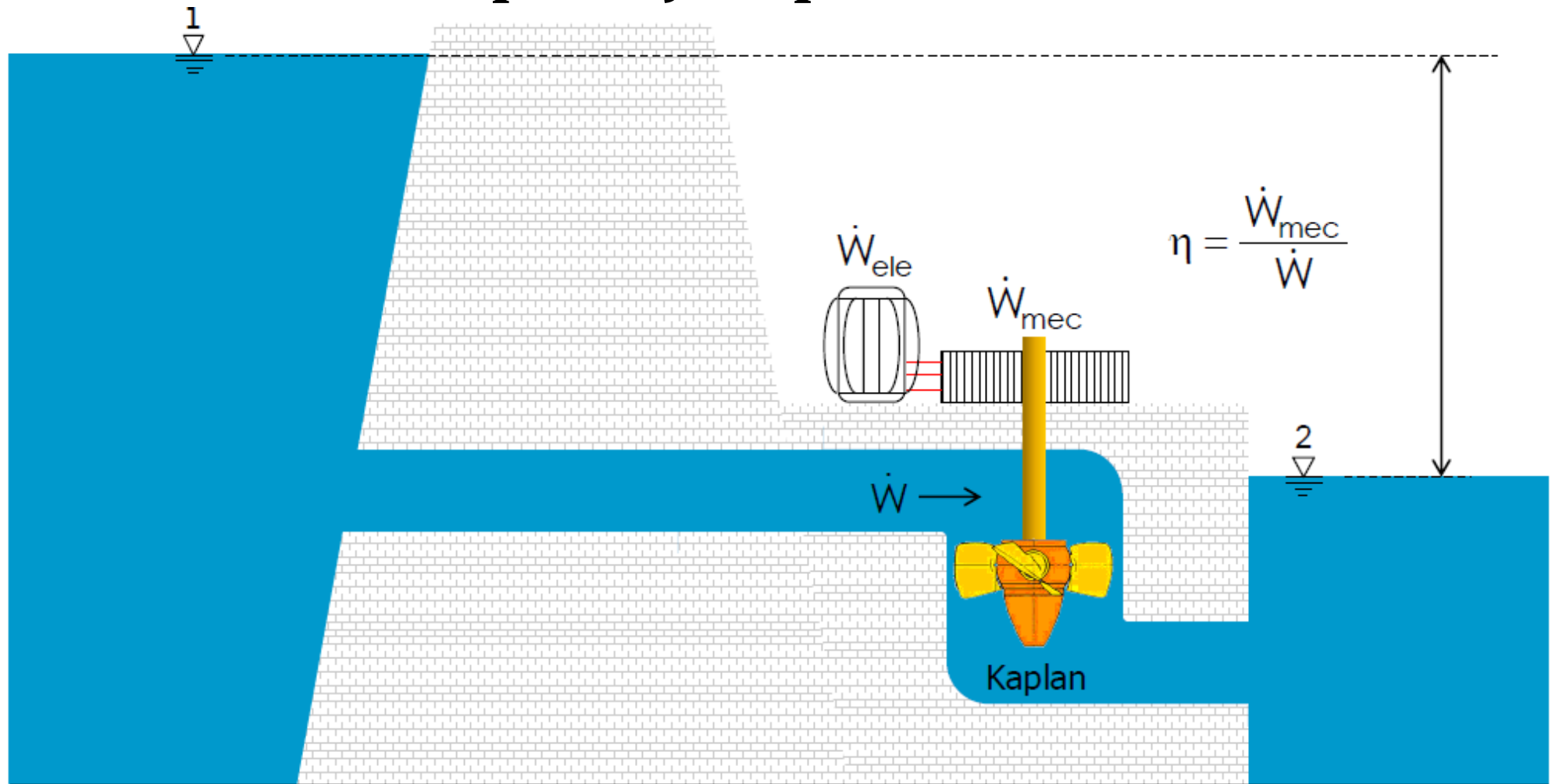
Símbolo em diagramas:



Aplicação prática 1

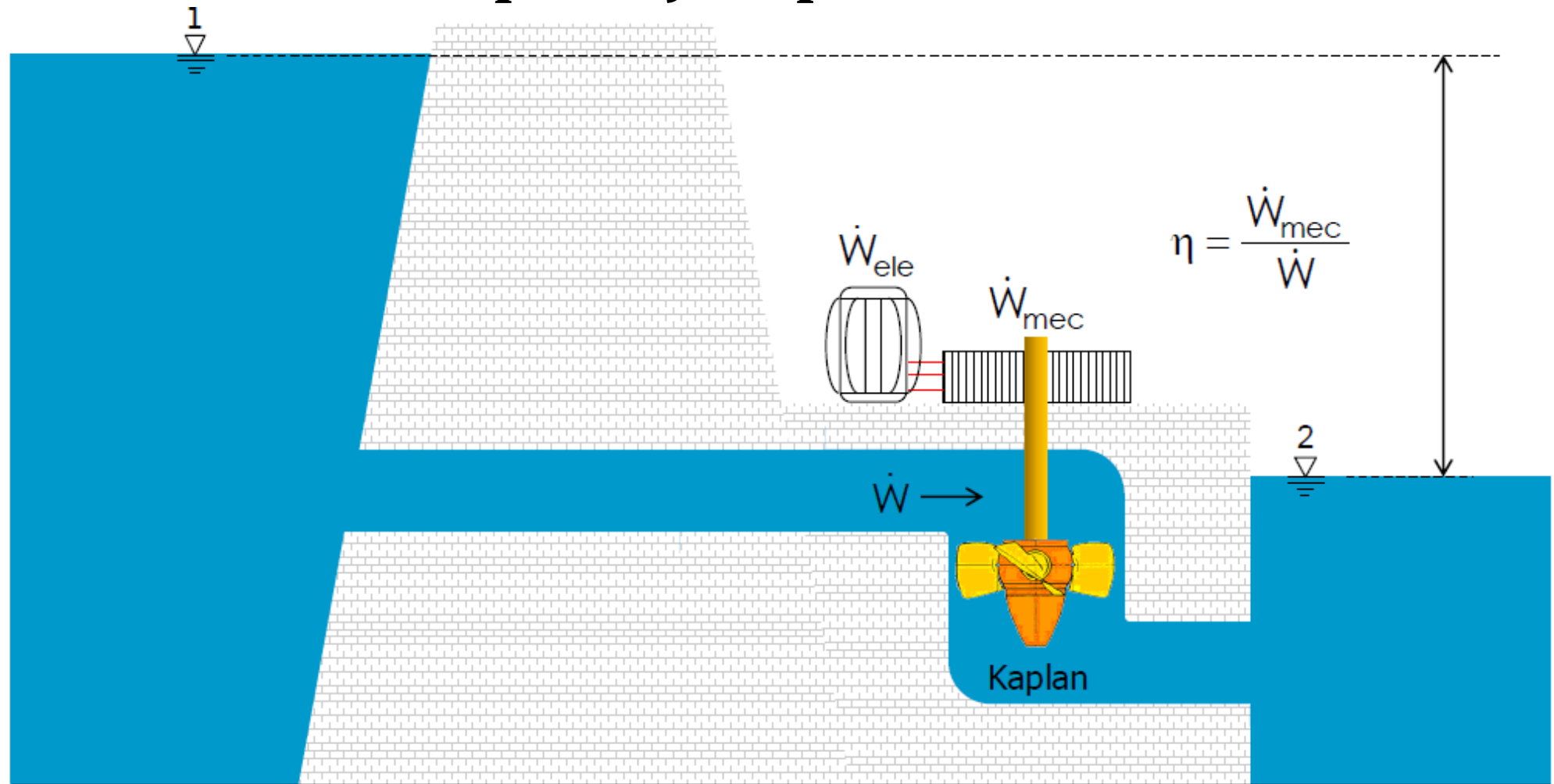


Aplicação prática 1



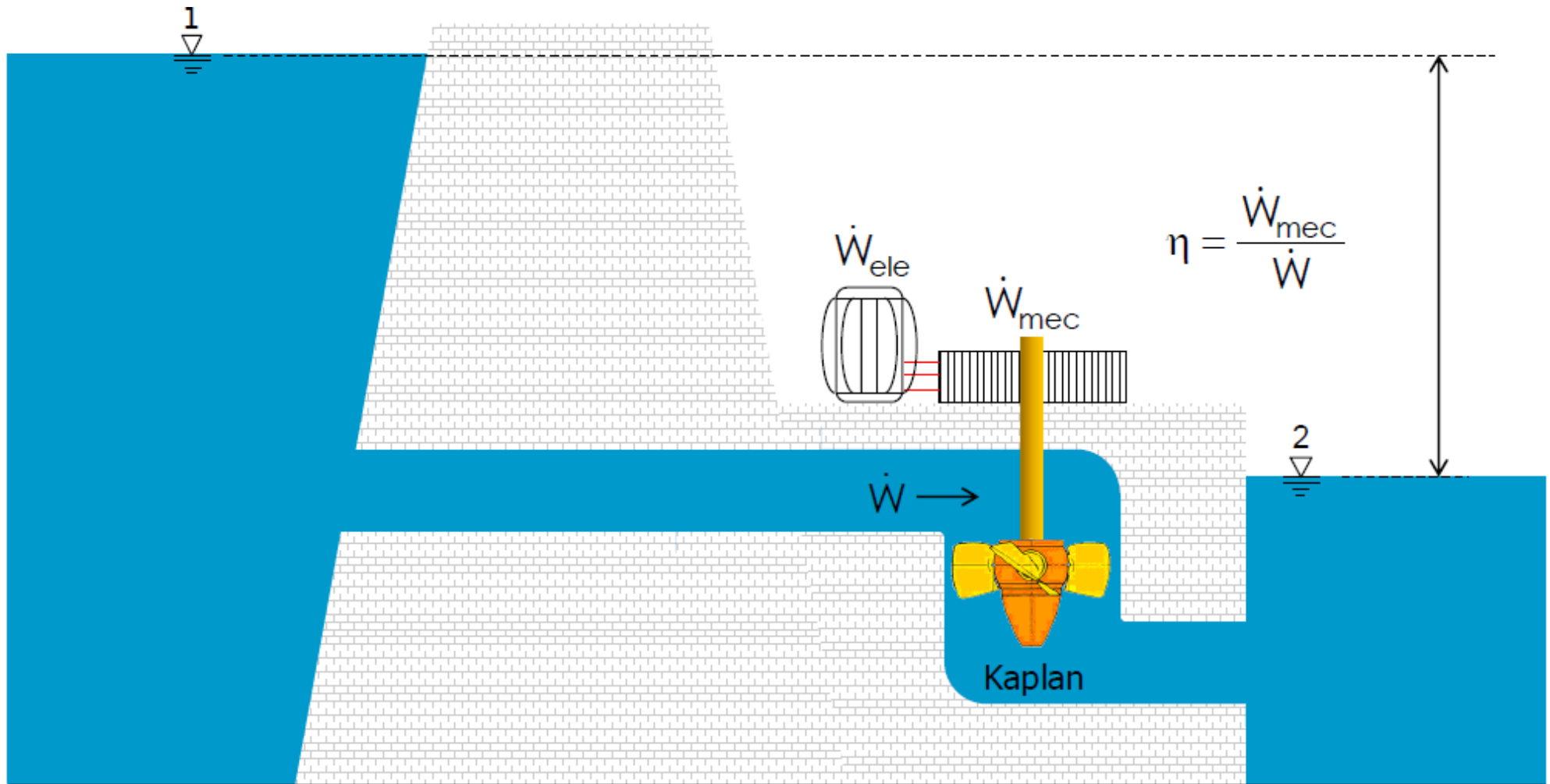
$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_s \dot{m}_s \left(u + Pv + gz + \frac{V^2}{2} \right)_s - \sum_e \dot{m}_e \left(u + Pv + gz + \frac{V^2}{2} \right)_e$$

Aplicação prática 1



$$\cancel{\dot{Q}} - \cancel{\dot{W}} = \sum_s \cancel{\dot{m}_s} \left(\cancel{u} + \cancel{Pv} + gz + \cancel{V^2/2} \right)_s - \sum_e \cancel{\dot{m}_e} \left(\cancel{u} + \cancel{Pv} + gz + \cancel{V^2/2} \right)_e$$

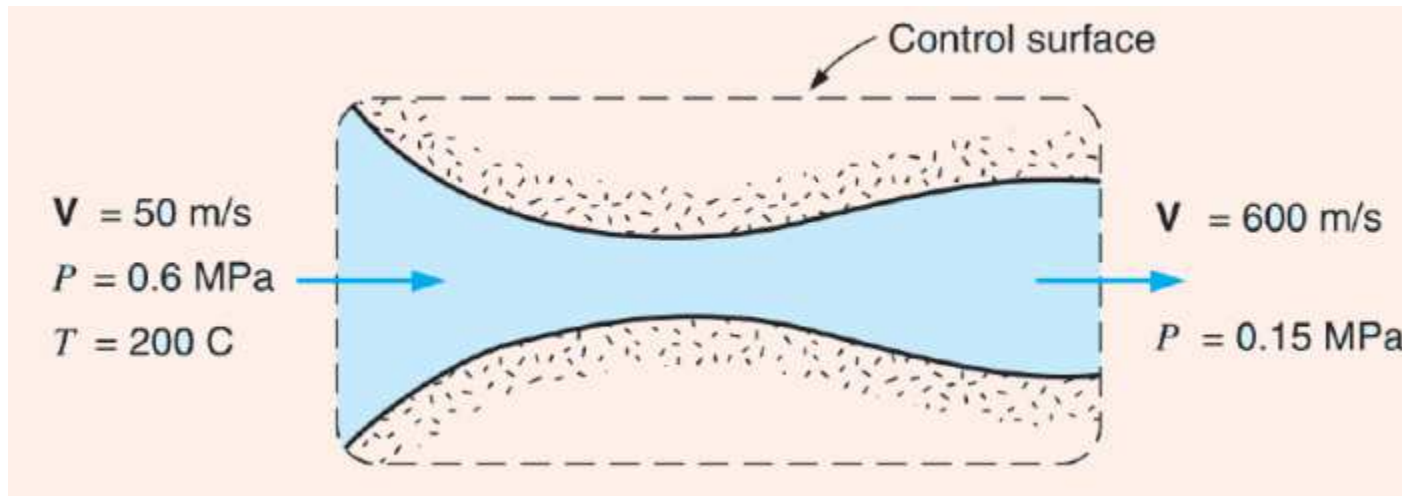
Aplicação prática 1



$$\dot{W} = \dot{m}g(z_2 - z_1)$$

$$\dot{W} = \dot{m}gh$$

Aplicação prática 2



Sabe-se as seguinte informações:

$p_e = 0,6 \text{ MPa}$, $T_e = 200^\circ\text{C}$ e $V_e = 50 \text{ m/s}$

$p_s = 0,15 \text{ MPa}$ e $V_s = 600 \text{ m/s}$

Determine a temperatura na saída do bocal.

Aplicação prática 2

- Hipóteses simplificadoras usuais:
 - Regime Permanente;
 - Trabalho é zero ($W=0$);
 - Despreza-se a troca de calor para o meio externo;
 - Despreza-se a diferença de energia potencial;
 - Diferença de energia cinética é importante!

Aplicação prática 2

- Conservação da massa:

$$\cancel{\frac{dM}{dt}} + \left(\sum_{saídas} \rho_k V_{n,k} A_k - \sum_{entradas} \rho_k V_{n,k} A_k \right) = 0$$

$$\sum_{Entradas} \rho_k V_{n,k} A_k = \sum_{saídas} \rho_k V_{n,k} A_k$$

$$\dot{m}_{entrada} = \dot{m}_{saída}$$

Aplicação prática 2

- Conservação da energia:

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_e \dot{m}_e \theta_e - \sum_s \dot{m}_s \theta_s$$

$$\cancel{\frac{dE_{VC}}{dt}} = \cancel{\dot{Q}} - \cancel{\dot{W}} + \sum_e \cancel{\dot{m}_e} \left(\cancel{h} + \cancel{gz} + \cancel{V^2/2} \right) - \sum_s \cancel{\dot{m}_s} \left(\cancel{h} + \cancel{gz} + \cancel{V^2/2} \right)$$

- Regime Permanente;
- Trabalho é zero ($W=0$);
- Despreza-se a troca de calor para o meio externo;
- Despreza-se a diferença de energia potencial;
- Diferença de energia cinética é importante!

Aplicação prática 2

- Conservação da energia:

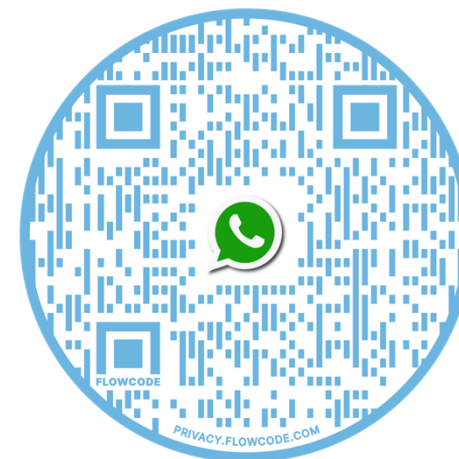
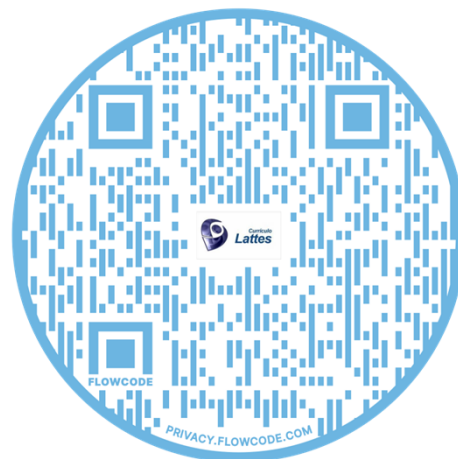
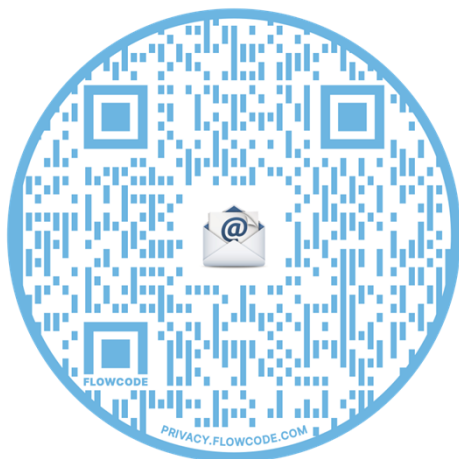
$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_e \dot{m}_e \left(h + gz + \mathbb{V}^2/2 \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h + gz + \mathbb{V}^2/2 \right)$$

$$\sum_e \dot{m}_e \left(h + \mathbb{V}^2/2 \right) = \sum_s \dot{m}_s \left(h + \mathbb{V}^2/2 \right)$$

- Cálculo da entalpia: $h_s = 2671,4 \text{ kJ/kg}$
- Conhecendo a entalpia e sabendo que a pressão na saída é de 0,15 Mpa, descobre-se que o estado é saturado, assim:

$$T_{sat} = 111,37^\circ\text{C}$$

$$x = 0,99$$



DSc. Eng. Samuel Moreira Duarte Santos

CREA 106478D

samuelfmoreira@id.uff.br

(21) 980031100

<https://www.linkedin.com/in/samuel-moreira-a3669824/>

<http://lattes.cnpq.br/8103816816128546>